

The underlying logic of complex forest fire prevention systems: dual analysis of uncertainty and stability

Wenming Chen

Forest Resource Protection, Prevention and Monitoring Center of Eshan County, Eshan, Yunnan, 653200, China

Abstract

Forest fire prevention is a typical complex adaptive system integrating ecological, social and technological elements, and the inherent uncertainty and core demand for stability coexist throughout its entire operation process. To clarify the internal operating laws of this system, this paper uses the theoretical tools of systems science to conduct an in-depth analysis of its underlying logic from the dual dimensions of uncertainty and stability. Firstly, it identifies the multi-source generation paths of uncertainty: ecological factors, human factors and technological factors. Secondly, it defines the three-dimensional connotation of system stability, including structural stability, functional stability and dynamic stability. Finally, it reveals the dialectical unity relationship between the two: uncertainty drives the system to break through path dependence and achieve adaptive evolution, while stability provides a basic framework for alleviating the negative impacts of uncertainty and ensuring the sustained effectiveness of prevention and control work. From the perspective of complex systems, this study enriches the theoretical system of forest fire prevention and provides a scientific basis for constructing a precise, efficient and resilient forest fire prevention system.

Keywords

Forest Fire Prevention; Complex System; Underlying Logic; Uncertainty; Stability; Dual Analysis

森林防火复杂系统的底层逻辑：不确定性与稳定性的双重解析

陈文明

峨山县林草资源保护预防监测中心，中国·云南 峨山 653200

摘 要

森林防火是融合生态、社会与技术要素的典型复杂适应系统，其运行全过程始终并存着内在不确定性与稳定性核心需求。为理清该系统的内在运行规律，本文运用系统科学理论工具，从不确定性与稳定性双重维度对其底层逻辑展开深度解析。首先，识别不确定性的多源生成路径：生态因素、人为因素、技术因素；其次，界定系统稳定性的三维内涵，包括结构稳定性、功能稳定性、动态稳定性；最后，揭示二者的辩证统一关系：不确定性驱动系统突破路径依赖、实现适应性演化，稳定性则为缓解不确定性负面影响、保障防控工作持续效能提供基础框架。本研究从复杂系统视角丰富了森林防火理论体系，为构建精准、高效、韧性的森林防火系统提供科学依据。

关键词

森林防火；复杂系统；底层逻辑；不确定性；稳定性；双重解析

1 引言

森林防火复杂系统的核心运行逻辑表现为：微观层面受各类随机因素影响，呈现显著不确定性，但这些看似无序的个体行为通过集体叠加，在宏观层面形成稳定可循的规律。因此，相关研究需同步兼顾“宏观维度提炼规律”与“微观维度追溯成因”，构建双视角的分析框架。

【作者简介】陈文明（1974-），男，彝族，中国云南峨山人，本科，高级工程师，从事森林防火、森林病虫害监测、森林资源监测保护研究。

2 宏观视角：捕捉相对稳定的核心规律

宏观层面的研究核心的是挖掘系统在长期、大范围场景下的确定性特征，为森林防火策略制定提供整体性指引，关键在于提炼“可重复验证、可提前预判”的三大规律：

2.1 时空分布规律

特定区域和时段会呈现固定的火灾高发特征：时间上，西南林区等区域受“冬春降水少、风力大”影响，每年 12 月至次年 2 月（冬季干燥）、3-5 月（春季干旱）形成防火高危期；空间上，山地陡坡、阳坡（光照强、植被含水率低）、林区道路两侧（人为活动密集）等区域，因地形或人为因素，成为火灾高频发生区^[1]。

2.2 火势演化规律

在相似植被类型与气象条件下,火灾发展会遵循固定路径:以针叶林火灾为例,在晴朗、微风环境中,通常经历“点烧起火→缓慢扩散→稳定燃烧→逐渐衰减”的四阶段演化,且火势蔓延速度与风速呈明显正相关,风速每提升 2m/s,蔓延速度平均增加 1.5 倍。

2.3 干预生效规律

消防措施的效果存在明确阈值:当火灾面积小于 10 公顷且风速低于 3 米/秒时,地面消防队伍采用“以水灭火+隔离带设置”的组合方式,灭火成功率可稳定保持在 80% 以上;一旦火势突破临界规模或气象条件恶化,干预效果会显著下降。

3 微观视角:拆解不确定性与规律的内在关联

微观层面的研究重点是解析随机因素如何通过累积、耦合作用支撑宏观规律,并明确规律成立的“临界条件”,具体可分为两步展开:

3.1 识别底层随机影响因素

这些因素的个体行为无固定轨迹,主要涵盖三类:

1. 环境随机性:包括无法预判的单点阵风(风速、风向突变)、受微地形遮挡影响的局部枯枝落叶湿度差异等;
2. 人为随机性:如林区作业人员丢弃烟头的具体位置、游客违规用火的时间节点等无固定模式的行为;
3. 生物随机性:例如特定区域昆虫啃食导致的树木枯损程度差异、鸟类偶然携带火种的行为等。

3.2 定位“随机托举规律”的临界点

当微观随机因素的累积效应突破某一阈值时,宏观规律开始稳定显现:某区域 50% 以上的针叶林叶片含水率低于 12% (微观湿度差异的集体累积),宏观上“火灾易扩散”的规律便会确立,12% 的含水率即为临界值;单日内林区随机出现的人为用火行为超过 20 次(个体随机行为的叠加),宏观上“火灾发生率骤升”的特征会显著呈现,20 次即为对应的临界点^[2]。

4 宏观规律与微观成因的对应解析

宏观规律是微观随机因素集体作用的必然结果,具有可观测、可应用的稳定属性,结合三大核心规律,其微观成因拆解如下:

4.1 时空分布规律的微观支撑

1. 时间集中性的成因:单日 10:00-16:00 火灾高发,源于该时段人类进入林区的随机活动增多,如随机焚烧秸秆(占人为火灾成因的 60%)、野外烧烤、祭祀用火、丢弃烟头等(占比 35%),这些分散行为在该时段集中叠加,推高了宏观火灾概率;春季火灾高发,则与微观层面“植被含水率随机下降”“短期大风随机出现”相关,春季降水少,植被水分随日照随机蒸发,当多数植被含水率低于 20%,再叠加短时随机大风(风速>5m/s),原本孤立的“随

机易燃点”会快速连接,形成宏观高发期^[3]。

2. 空间聚集性的成因:林区道路两侧火灾集中,因道路周边的“随机火源”(车辆抛洒火星、行人丢弃火种)密度是林区深处的 8-10 倍,随机火源的密集分布使该区域火灾概率显著升高;山地阳坡火灾频发,源于阳坡微观“局部温度随机升高”(同一时段比阴坡高 5-8℃)、“植被干燥度随机差异”(含水率比阴坡低 10%-15%),这些温湿度差异使阳坡更易形成“随机起火点”,呈现宏观聚集特征。

4.2 火势演化规律的微观支撑

1. 初期扩散阶段:火势蔓延缓慢,因微观层面“可燃物随机稀疏”,起火点周边的枯枝、落叶等易燃物呈分散状态,热传导仅能在小范围随机传递,无法快速连片燃烧;

2. 中期爆发阶段:火势蔓延速度骤升,源于微观“可燃物随机连接”与“热对流随机增强”——初期起火点烧穿局部稀疏可燃物后,会随机接触到更密集的植被(灌木、乔木),同时燃烧产生的热气流形成局部对流(上升气流速度达 2-3m/s),推动火焰随机扩散,大量扩散路径叠加形成宏观爆发式增长;

3. 后期衰减阶段:火势逐渐减弱,因微观“可燃物随机耗尽”,火场核心区域的枯枝、针叶等易燃物已大量消耗,剩余可燃物多为不易燃的树干(含水率>30%),热传导随机受阻,无法持续提供燃烧能量。

4.3 干预生效规律的微观支撑

1. 初期干预高成功率:火灾初期(覆盖面积<5公顷),微观“燃烧点随机孤立”,单个火点面积多<10m²,人工扑打、就近浇水等干预措施能快速覆盖这些孤立火点,阻止其随机连接,宏观成功率高达 90% 以上;

2. 中期干预低成功率:当火势突破 10 公顷进入中期,微观“燃烧网络随机形成”,火点间通过随机热传导、热辐射连接,单个干预措施仅能扑灭局部火点,无法阻断整体燃烧网络扩散,宏观成功率大幅下降;

3. 措施适配差异:针叶林火灾需优先“以水灭火”,因针叶内部油脂呈随机点状分布,水分渗透能随机覆盖这些油脂点,阻止持续燃烧;阔叶林易燃物多为枯枝(无油脂),微观“热传导随机较弱”,人工清理隔离带即可阻断随机热传递,形成宏观上的措施适配差异^[4]。

5 宏观规律的具体特征与应用价值

宏观规律是森林防火策略制定的核心依据,其稳定的特征的可直接转化为防控行动,具体如下:

5.1 时空分布规律:明确火灾“何时、何地”高发

1. 时间维度:全球多数林区呈“两季高发”,西南林区集中在 3-5 月(春旱)和 12 月-次年 2 月(冬燥);单日高发时段为 10:00-16:00,该时段光照强、空气湿度低、地表温度高,火灾发生概率是其他时段的 3-5 倍。

2. 空间维度:火灾多聚集在林区道路两侧、村落周边林区、农林交错带(人为活动相关区域),以及山地阳坡、

陡坡（火势蔓延快，比缓坡快 2-3 倍）、峡谷（易形成狭管效应，风力助推火势）等地形高危区域。

5.2 火势演化规律：明确火灾“如何发展”阶段化演变

1. 初期（扩散阶段）：火势覆盖面积通常 < 5 公顷，蔓延速度 0.2-0.5 米 / 分钟，仅局部植被燃烧，易控制；
2. 中期（爆发阶段）：火势覆盖面积 > 10 公顷，蔓延速度升至 1-3 米 / 分钟，易形成“火墙”“树冠火”，受风力影响显著；
3. 后期（衰减阶段）：火场核心区域可燃物大量消耗，或受降雨、干预影响，火势强度减弱，蔓延速度降至 0.1 米 / 分钟以下。

关键关联：针叶林火灾强度是阔叶林的 2-3 倍（针叶含油脂）；林区空气相对湿度 < 40% 时火灾概率显著上升，< 25% 时极易引发大面积火灾。

5.3 干预生效规律：明确“何种措施何时有效”

1. 干预时机阈值：火灾处于“初期阶段”（覆盖面积 < 5 公顷、燃烧时间 < 2 小时）时，“人工扑打+就近水源灭火”成功率超 90%；突破“中期阶段”（覆盖面积 > 10 公顷）后，同措施成功率降至 50% 以下，需调用重型资源。

措施适配规律：

2. 预防阶段：在高危区域提前设置 10-15 米宽防火隔离带，火灾蔓延阻断率可提升 70% 以上；
3. 处置阶段：针叶林火灾优先“以水灭火+泡沫覆盖”（抑制油脂燃烧），阔叶林火灾可采用“人工清理隔离带+风力灭火”（低成本高效）；
4. 恢复阶段：火灾熄灭后 1-2 天内，若遇干旱、大风天气，复燃概率是正常时期的 4 倍，需强化余火排查^[9]。

6 基于宏观规律的森林防火策略

将三大规律转化为“精准预警、科学防控、高效处置”的具体措施，可实现从“被动应对”到“主动预防”的转变：

6.1 依托时空分布规律：靶向预警与重点防控

1. 时间维度：针对季节性高发，提前 1-2 个月启动“森林防火特护期”，增加巡逻频次并推送防火警示；针对时段性高发，在 10:00-16:00 暂停林区非必要作业，增设入山火种检查点。

2. 空间维度：将阳坡、道路两侧等区域划定为“一级防火区”，加密防火隔离带（每 500 米设 1 条宽 10 米隔离带），靠前储备灭火物资；在陡坡、峡谷等区域安装红外监控，实现 24 小时实时监测。

6.2 依托火势演化规律：分阶段火情处置

1. 初期阶段（面积 < 5 公顷）：调配就近地面消防队伍（林区管护站人员、乡镇应急队），采用“以水灭火+风力灭火”，10 分钟内抵达处置；地形复杂区同步调用无人机投掷干粉灭火剂。

2. 中期阶段（面积 5-20 公顷）：优先在火势蔓延方向开辟 ≥ 20 米宽的应急隔离带，或“以火攻火”切断可燃物

供给，同步调用消防车、洒水直升机等大型设备压制火势。

3. 后期阶段：组织“拉网式排查”火场，清理未完全燃烧的枯枝、树根，用沙土覆盖或浇水浇灭余火；腐殖层较厚区域需开挖宽 ≥ 40CM、深至生土层的防火沟，防止复燃^[6]。

6.3 依托干预生效规律：精准化资源调配

1. 按阈值调配资源：火情满足“低风险条件”（面积 < 5 公顷、风速 < 3m/s）时，仅调配村级扑火队等基层力量；突破临界值后，立即升级响应，调用专业森林消防队伍、直升机等重型资源。

2. 按特征选择措施：平缓地形可组织地面队伍近距离扑打；悬崖、峡谷等危险区域依托无人机监测+远程投掷灭火弹；遇风速超 5m/s 等不利气象条件，暂停地面人员直接扑打，转为“空中压制+隔离带设置”组合措施。

7 结语

森林防火作为典型的复杂适应系统，其底层逻辑始终围绕不确定性与稳定性的动态耦合展开。微观层面的环境、人为、生物等随机因素，构成了系统运行的不确定性本源，而这些微观随机行为的集体叠加与演化，又在宏观层面形成了可预判、可应用的稳定规律，二者共同塑造了森林防火系统的运行特征。本文从宏微双视角展开解析，明晰了时空分布、火势演化、干预生效三大核心规律的内涵与微观支撑，也揭示了规律与随机因素的内在关联，为理解森林防火复杂系统的运行逻辑提供了新的视角。

森林防火工作的科学化推进，关键在于把握宏微双视角的辩证统一，以宏观规律锚定防控工作的整体方向，以微观不确定性的解析细化防控举措。唯有将宏观规律的指导性 与微观随机因素的应对性相结合，才能推动森林防火从被动处置向主动预防、精准防控转变，不断提升森林防火系统的适应性与韧性。本研究 的分析框架与结论，可为森林防火预警体系构建、防控策略制定、应急资源调配提供理论参考，助力筑牢森林生态安全的防火屏障，推动林业生态系统的可持续发展。

参考文献

- [1] 田晓瑞, 舒立福, 王玉明, 林火蔓延模型及其适用性研究进展【J】.科技导报, 2023, 41(12): 45-56.
- [2] 田国家林业和草原局防火司, 图强林业局“高山哨兵+数字电台”现代化林火防空体系建设实践【J】.森林防火, 2025, (2): 18-24.
- [3] 田应急管理部火灾防治管理司.2020-2024年全国森林草原火灾防空形式分析与对策【J】.中国应急管理, 2025, (1): 32-40.
- [4] 田宋正满, 高长科, 神农架林区林火时间分布特征及“两山季时转换”防火机制【J】.湖北林业科技, 2022, 51(4): 23-29.
- [5] 田李嵩恂, 郑伟, 气象要素对森林火灾发生发展的影响及卫星遥感监测应用【J】.气象, 2017, 43(4): 489-496.
- [6] 田内蒙古阿尔山森工公司.林火地理分布与地形因子关联性研究【J】.林业资源管理, 2019, (3): 56-62.